

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

**ОСАДЦА ЯРОСЛАВ МИХАЙЛОВИЧ**

УДК 628.98; 535.274.4

**ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СВІТЛОВОГО ПОЛЯ ЗА ДО-  
ПОМОГОЮ МАТРИЧНИХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З  
ЦИФРОВИМ ПРЕДСТАВЛЕННЯМ СИГНАЛУ**

05.09.07 – світлотехніка та джерела світла

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2012

## Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Андрійчук Володимир Андрійович**,  
завідувач кафедри світлотехніки  
Тернопільського національного технічного  
університету імені Івана Пулюя

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Кожушко Григорій Мефодійович**,  
завідувач кафедри ВНЗ Укоопспілки  
Полтавського університету економіки і  
торгівлі, м. Полтава;

доктор технічних наук, професор  
**Назаренко Леонід Андрійович**,  
завідувач кафедри світлотехніки та джерел світла  
Харківської національної академії міського госпо-  
дарства, м. Харків.

**Захист відбудеться** "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2012 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.04 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України за адресою: **46001 Україна, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.**

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України за адресою: **46001 Україна, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.**

**Автореферат розісланий** "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2012 р.

*Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради*

Тарасенко М.Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** При проектуванні та експлуатації освітлювальних установок необхідно дотримуватись їх регламентованих світлотехнічних параметрів. Це надзвичайно важливо для забезпечення якості освітлення. Вимірювання світлотехнічних параметрів як систем освітлення в цілому, так і їх елементів є необхідним при:

- дослідженні новостворених установок зовнішнього та внутрішнього освітлення з метою встановлення відповідності між реальними та розрахунковими характеристиками;
- систематичних дослідженнях протягом терміну служби освітлювальних установок з метою фіксування зниження їх характеристик (моніторинг) для зіставлення з програмою експлуатації.

В даний час велика увага приділяється методам і засобам світлотехнічних вимірювань. Одним із основних елементів фотометричних вимірювальних пристроїв є перетворювачі оптичного випромінювання в електричний сигнал. Останнім часом багато уваги приділяють багатоелементним оптико-цифровим перетворювачам. Цей підхід дає можливість ефективно вирішувати широкий спектр завдань із залученням сучасних інформаційних технологій.

Вимірювання з використанням багатоелементних давачів оптичного сигналу відрізняються перш за все оперативністю та можливістю отримання великої кількості даних одночасно. Ці багатоелементні давачі об'єднують у групи лінійних або матричних фотоперетворювачів, які використовуються в якості формувачів зображень у цифрових фото- та відеокамерах і скануючих пристроях.

Такі типи пристроїв знайшли використання в медицині, установках дистанційного зондування землі, мікроскопії.

Вперше матричні фотоперетворювачі були впроваджені у гоніофотометричних установках для визначення світлорозподілу джерел світла та світлових приладів, також у пристроях для вимірювання світлотехнічних параметрів установок зовнішнього освітлення. Ці вимірювання базуються на отриманні зображень цифровою фотокамерою у вигляді двовимірних таблиць та проведенні розрахунку й аналізу отриманих даних з допомогою спеціально розроблених програм.

Тому основними питаннями при використанні матричних фотоперетворювачів з цифровим представленням сигналу у фотометричних вимірюваннях є: математичний опис вимірювальних пристроїв; спосіб та засоби проведення вимірювань; отримання залежностей між вхідними та вихідними сигналами вимірювальних пристроїв; розроблення програмного забезпечення для розрахунку світлотехнічних характеристик за отриманими зображеннями; оцінювання похибок вимірювання. Отож проблема, пов'язана з використанням ма-

тричних фотоперетворювачів світла з цифровим представленням сигналу у фотометрії, *є актуальною*.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Роботу виконано на кафедрі світлотехніки ТНТУ імені І. Пулюя. Автор брав участь у виконанні держбюджетної науково-дослідної теми ДІ 148-08 «Розробка методів вимірювання світлотехнічних параметрів та енергетичної ефективності напівпровідникових джерел світла», 2008 – 2010.

### **Мета й задачі дослідження**

Метою дослідження є побудова математичної моделі системи світний об'єкт – фотокамера та використання сучасних комп'ютерних технологій при обробленні й аналізі отриманих зображень, а також розроблення методики градування пристроїв на основі матричних фотоперетворювачів і проведення дистанційних вимірювань параметрів світлового поля за допомогою пристроїв з матричними та лінійними фотоперетворювачами.

Для досягнення мети в роботі вирішувались наступні задачі:

- побудова та удосконалення математичних моделей, які б дозволяли проводити розрахунок параметрів світлового поля за двовимірними цифровими зображеннями, отриманими за допомогою фотокамер з матричними фотоперетворювачами;

- розроблення алгоритму та програми розрахунку параметрів світлового поля за двовимірними цифровими зображеннями освітлених об'єктів;

- розроблення методики та експериментальної установки для градування як матричних приймачів, так і пристроїв з даними приймачами;

- розроблення методики вимірювання світлотехнічних характеристик світних об'єктів за допомогою фотокамер з матричними оптичними перетворювачами;

- проведення дистанційних вимірювань розподілу яскравості й освітленості досліджуваних об'єктів та порівняння їх із нормативними параметрами, а також вимірювання світлотехнічних параметрів джерел світла.

**Об'єкт дослідження** – процес фотометрування світлового поля у форматі двовимірних даних.

**Предмет дослідження** – матричні фотоперетворювачі та фотокамери (на їх основі) з цифровим представленням сигналу.

**Методи дослідження.** Поставлені задачі вирішувалися на основі:

- а) використання теорії фотометрії світних об'єктів.
- б) принципів еквівалентності яскравості об'єкта та його зображення;
- в) методів обробки двовимірних зображень;
- г) методу моделювання з допомогою камери-обскура;
- д) методів математичної статистики.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Створено математичні моделі вимірювальних пристроїв з матричними та лінійними оптичними перетворювачами, що дозволило за двовимірними зображеннями здійснювати розрахунок світлотехнічних параметрів світних об'єктів.

2. Удосконалено математичну модель системи світний об'єкт – фотокамера з матричним фотоперетворювачем для проведення дистанційних вимірювань розподілу освітленості та яскравості по поверхні об'єкта.

3. На основі проведених досліджень фотоелектричних характеристик фотоперетворювачів встановлено діапазон лінійності характеристичних кривих та внесено корективи до програм розрахунків, що дозволяє визначати межі вимірювань світлотехнічних параметрів світних об'єктів з допомогою даних фотоперетворювачів.

4. Набула подальшого розвитку фотометрична система для дистанційних вимірювань світлотехнічних параметрів світних об'єктів, що дозволило оперативно отримувати інформацію про стан зовнішнього освітлення та проводити її співставлення з нормативними вимогами.

### **Практичне значення отриманих результатів**

1. Розроблено методику вимірювання світлотехнічних параметрів світних об'єктів за допомогою фотокамер з матричними фотоперетворювачами.

2. Розроблено методику градуювання матричних фотоперетворювачів та пристроїв на їх основі, яка дозволяє визначити діапазон лінійності характеристичної кривої матричного фотоперетворювача. Проведено градуювання фотокамери OLYMPUS E-420.

3. Запропоновано методику вимірювання світлорозподілу джерел світла за допомогою пристроїв з лінійними та матричними фотоперетворювачами.

4. На основі вперше проведених вимірювань світлорозподілу напівпровідникових джерел світла з допомогою пристроїв з лінійними та матричними фотоперетворювачами запропоновано методику вхідного контролю світлотехнічних параметрів світлодіодів, що дозволило скоротити час та витрати на його проведення.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах [1, 8, 9] проведено аналіз фотоперетворювачів з цифровим представленням сигналу, встановлено основні шляхи використання матричних фотоперетворювачів та приладів на їх основі для фотометричних вимірювань. У роботі [2] розроблено структурну схему автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи на базі спектрофотометра СФ-46 для контролю світлотехнічних характеристик джерел світла та світлотехнічних матеріалів. У роботах [6, 10] розроблено модель пристрою для вимірювання параметрів світлового поля з використанням матричних оптичних перетворювачів та методику вимірювання параметрів світлового

поля на прикладі напівпровідникових джерел світла. В роботах [3, 4, 7, 12–15, 18] запропоновано методику градування фотокамер з матричними фотоперетворювачами, а також методику вимірювання світлотехнічних параметрів світних об'єктів. У роботах [5, 11, 16, 17] створено математичні моделі вимірювальних пристроїв на основі цифрових фотокамер та планшетних сканувальних пристроїв і запропоновано методику вимірювання світлотехнічних параметрів напівпровідникових джерел світла.

**Апробація.** Основні результати дисертації оприлюднені та обговорені на: III Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики», (Харків, 22–23 квітня 2009 р.); Всеукраїнській науковій конференції ТДТУ, (Тернопіль, 13–14 травня 2009 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», (Тернопіль, 20–21 травня 2010 р.); 15<sup>th</sup> INTERNATIONAL WORKSHOP ON INORGANIC AND ORGANIC ELEKTROLUMINESCENCE & 2010 INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SCIENCES AND TECHNOLOGY OF EMISSIVE DISPLAYS AND LIGHTING & XVIII ADVANCED DISPLAYS TECHNOLOGIES INTERNATIONAL SYMPOSIUM, (St-Peterburg, Russia. September 27– October 1, 2010); XIV Науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 27–28 жовтня 2010 р.); Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», (Тернопіль, 21–22 грудня 2010 р.); VIII Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики», (Саранск, 25–26 ноября 2010 г.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики», (Харків, 13–14 квітня 2011 р.); Науково-технічній конференції «Сучасний стан і перспективи розвитку світлотехніки та електроенергетики», (Тернопіль, 19 травня 2011 р.); XV Науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 14–15 грудня 2011 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Світлотехніка та електроенергетика: історія, проблеми, перспективи», (Тернопіль, 24–26 квітня 2012 р.).

#### **Публікації**

За темою дисертації опубліковано 18 робіт, зокрема 5 статей у ліцензованих ДАК наукових періодичних виданнях.

#### **Структура й обсяг дисертації**

Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел. Загальний обсяг дисертації – 145 сторінок основного тексту, в тому числі: 63 рисунки та фотографії, 22 таблиці, список використаних літературних джерел із 110 найменувань на 11 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації – 134 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** вказано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано її мету й основні завдання, наукову новизну отриманих результатів, їх практичне значення, відзначено особистий внесок здобувача та апробації результатів роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасних методів вимірювання параметрів світлового поля та оптико-електронних приймачів, які використовуються у світлотехнічних вимірюваннях. На основі аналізу вимог, які виконуються фотоприймачами, встановлено, що ефективнішим є використання багатоелементних фотоперетворювачів.

Проаналізовано особливості конструкції та принципи роботи лінійних і матричних фотоперетворювачів на основі пристроїв із зарядовим зв'язком та комплементарної структури типу метал-оксид-напівпровідник. Наведено основні шляхи використання матричних оптичних перетворювачів у фотометричних вимірюваннях, а також показано основні переваги й недоліки їх використання.

Проведено аналіз програмного забезпечення обробки зображень та розрахунку за ними необхідних параметрів.

Сформульовано основні завдання дослідження вимірювальних пристроїв на основі матричних фотоперетворювачів з цифровим представленням сигналу.

У **другому розділі** отримано вирази для розрахунку яскравості стиснених та нестиснених цифрових графічних зображень. Яскравість цифрового зображення, представленого в кольоровій RGB-системі, визначено шляхом переходу в XYZ-систему, в якій координата Y визначає яскравість. Для найпоширеніших стандартів sRGB та Adobe RGB вирази для визначення Y-координати мають вигляд

$$Y_{sRGB} = 0,213 \cdot R + 0,715 \cdot G + 0,072 \cdot B, \quad (1)$$

$$Y_{ARGB} = 0,297 \cdot R + 0,627 \cdot G + 0,075 \cdot B. \quad (2)$$

Створено математичну модель вимірювального пристрою з матричним світлоперетворювачем, яка дозволяє розраховувати світлотехнічні параметри джерел світла. Дана модель складається з точкового джерела світла  $S$ , розташованого на осі  $Oz$ , та матричного оптичного перетворювача, розміщеного в площині, перпендикулярній до однієї з осей (рис. 1).

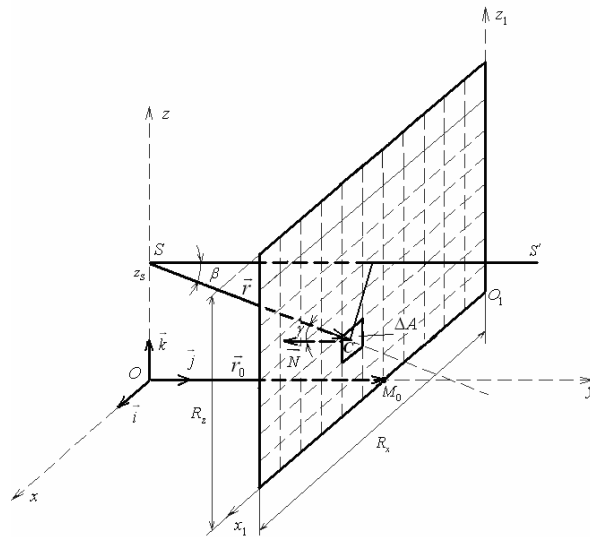


Рис. 1. Графічне представлення вимірювального пристрою з матричним світлоперетворювачем

Вирази для визначення світлового розподілу випромінювача для даної моделі

$$I(\beta) = \frac{E_{ij} |\overline{SC}|^3}{(\overline{SC} \cdot (-\overline{N}))},$$

де  $\overline{SC} = x_c \vec{i} + y_c \vec{j} + (z_c - z_s) \vec{k}$ ;  $|\overline{SC}| = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + (z_c - z_s)^2}$ ;  $E_{ij}$  – освітленість елемента матричного фотоперетворювача; .

Вирази для визначення світлового потоку та яскравості джерела світла мають вигляд

$$\Phi = \Delta A \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \Delta E_{ij}, \quad L = \frac{\Phi}{\Delta A_1 \cdot \Delta A_2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{\kappa=1}^k \left[ \frac{(\overline{SC}_{ij} \cdot (-\overline{N}))^2}{|\overline{SC}_{ij}|^2} \right]},$$

де  $\Delta A_1, \Delta A_2$  – площа елемента випромінювання та елемента приймача відповідно.

Задача визначення світлотехнічних параметрів джерел світла та світлових приладів зводилася до вимірювання освітленості або яскравості їх зображень. Тому було розроблено математичну модель системи світний об'єкт – фотокамера, за допомогою якої можна розраховувати світлотехнічні параметри об'єкта за отриманими зображеннями. В цій моделі світним об'єктом був освітлений екран, яскравість якого підпорядковується закону Ламберта. На відстані  $h_1$  від даної поверхні розміщено фотокамеру з матричним фотоперетворювачем (рис. 2).



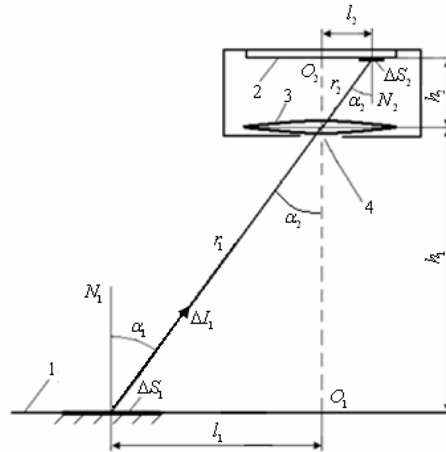


Рис. 2. Геометричне представлення моделі системи світна поверхня – фотокамера: 1 – світна поверхня; 2 – матричний фотоперетворювач; 3 – оптична система фотокамери; 4 – вхідний отвір оптичної системи

Для даної системи було отримано вираз для розрахунку яскравості  $L$  світного об'єкта у напрямку об'єктива та освітленості  $E_1$  світної поверхні

$$L = \frac{E \cdot (l_2^2 + h_2^2)^2}{\tau \cdot \Delta S_{e.o.} \cdot h_2^2}, \quad E_1 = \frac{E \cdot (l_2^2 + h_2^2)^2 \cdot \pi}{\tau \cdot \beta \cdot \Delta S_{e.o.} \cdot h_2^2},$$

де  $E$  – освітленість матричного фотоперетворювача в зоні зображення елемента світної поверхні;  $\tau$  – коефіцієнт пропускання оптичної системи фотокамери;  $\Delta S_{e.o.}$  – площа вхідного отвору оптичної системи фотокамери;  $\beta$  – коефіцієнт яскравості світної поверхні.

**У третьому розділі** розроблено методику градуювання фотокамери з матричними оптичними перетворювачами, в результаті чого отримано залежності між вхідними та вихідними величинами, які наведено у вигляді таблиць, графіків або аналітичних виразів. Градуювання проведено, виходячи з таких умов: еталонне джерело світла типу А; неполяризоване випромінювання; рівномірна освітленість світлочутливої поверхні, на яку попадає світло; перпендикулярне падіння світла; температура навколишнього середовища 25 °С.

Для здійснення градуювання змонтована установка, схема якої наведена на рис. 3. На фотометричній лаві було розміщено еталонне джерело світла, екран та фотокамеру. Джерело світла 1 та фотокамеру 4 розмістили на одній оптичній осі, перпендикулярній до поверхні екрана 3. Під час вимірювань лампа розжарювання знаходилась у вертикальному положенні цоколем вниз. З метою усунення впливу стороннього світла між джерелом випромінювання та екраном була розміщена діафрагма 2.

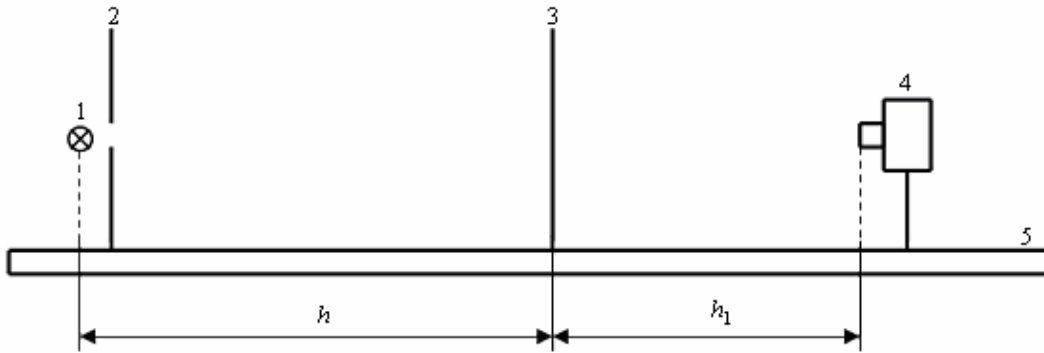


Рис. 3. Схема установки для градування фотокамери з матричними оптичними перетворювачами

У якості джерел світла використано лампи розжарення різних потужностей з відомими осьовими силами світла.

Розмір та форму елемента світної поверхні екрана вибрали аналогічно розміру та формі світлочутливого елемента, який використано при вимірюваннях осьової сили світла ламп розжарювання. Даний елемент мав форму круга діаметром 0,04 м.

Як екран використали пластину з матового скла з коефіцієнтом пропускання  $\tau_{екр} = 0,78$ . Коефіцієнти пропускання та відбивання екранів були виміряні з допомогою фотометра ФМШ-56.

Світловий потік, який пройшов крізь пластину, дифузно розсіювався, що дозволяло вважати світну поверхню рівнояскравою.

Освітленість поверхонь екранів виміряно за допомогою люксметра Ю-116. Зміна освітленості й відповідно яскравості світної поверхні здійснювалася шляхом зміни відстані  $h$  від джерела світла до екрану, тоді як відстань між екраном та фотокамерою залишалася сталою і  $h_1 = 0,5$  м.

Освітленість матричного оптичного перетворювача в зоні зображення екрана визначали за формулою

$$E = 0,225 \cdot \tau_{екр} \cdot \left(\frac{1}{F}\right)^2 \cdot \frac{I_0}{h^2},$$

де  $\tau_{екр}$  – коефіцієнт пропускання екрана;  $F$  – число діафрагми об'єктива;  $I_0$  – осьова сила світла еталонного джерела.

З метою визначення впливу стиснення даних на величину Y-координати зображення були представлені у графічних форматах JPEG та RAW. За отриманими даними були побудовані графіки залежностей Y-координати від освітленості, які наведено на рис. 4.

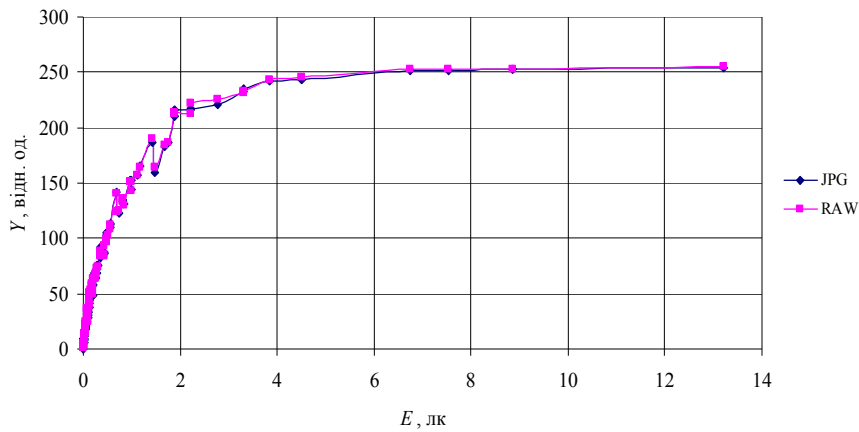


Рис. 4. Залежність  $Y$ -координати від освітленості матричного оптичного претворювача

Враховуючи те, що фотографічний приймач реагує на загальну кількість світлової енергії, яку у фотографічній практиці називають експозицією, і визначають як  $H = E \cdot t$ , де  $t$  – час дії світла на фотоприймач (час витримки затвора), була побудована градувальна (характеристична) крива матричного оптичного перетворювача у вигляді залежності логарифма  $Y$ -координати від логарифма експозиції  $H$  (рис. 5).

Для фотокамери OLYMPUS E-420 встановлено, що в межах від  $y = \lg Y = 1$  до  $y = \lg Y = 2,31$  зазначена залежність лінійна. У даних межах залежності математично описані лінійними функціями виду  $y = a + b \cdot x$ , коефіцієнти яких отримано за допомогою методу найменших квадратів. При цьому відносна максимальна похибка апроксимації не перевищувала 5 %. На рис. 6 показано залежність логарифма яскравості зображення від логарифма експозиції для зображень, представлених у форматі JPEG.

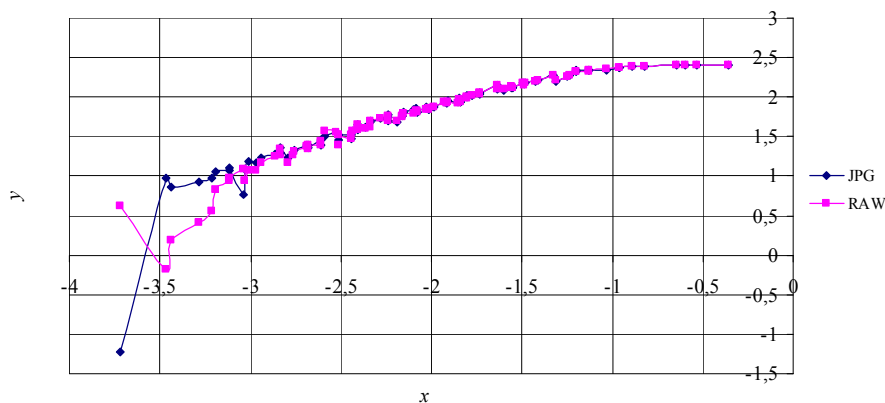


Рис. 5. Залежності  $y = \lg Y$  від  $x = \lg(E \cdot t)$

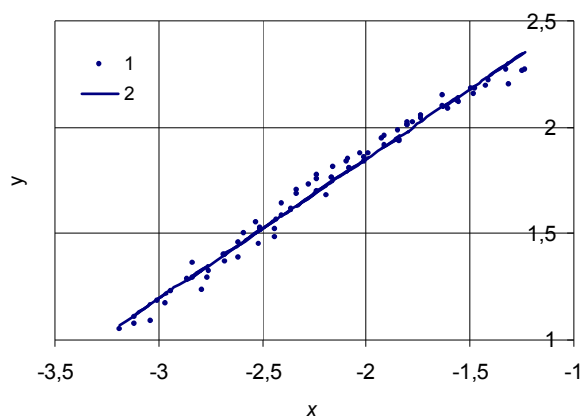


Рис. 6. Залежність  $y = \lg Y$  від  $x = \lg(E \cdot t)$ , отримано:  
1 – експериментально; 2 – шляхом апроксимації лінійною функцією

Для вимірювання розподілу освітленості по досліджуваній поверхні була використана установка, схема якої зображена на рис. 7.

В якості джерела світла 1 використано світлодіод або лампу розжарення. В якості екрана 2 – білий папір з коефіцієнтом дифузного відбивання  $\rho = 0,74$ . Освітленість поверхні екрана вимірювалась за допомогою люксметра, через кожні 0,10 м від мінус  $l_1$  до плюс  $l_1$ . Джерело світла було розміщено на висоті  $h = 1,0; 1,5; 2,0$  м. Вимірювання проведено при заданому постійному входньому отворі (діафрагмі) й постійній експозиції матричного перетворювача фотокамери.

Освітленість світної поверхні визначалась за формулою

$$E_1 = \frac{\pi \cdot L}{\beta} = \frac{4 \cdot F^2}{\tau \cdot \beta \cdot f^4} \cdot \frac{1}{t} \cdot (10^{-a} \cdot Y)^{\frac{1}{b}} \cdot \left( \frac{W \cdot H}{Q_{заг}} \left[ \left( n - \frac{N}{2} \right)^2 + \left( m - \frac{M}{2} \right)^2 \right] + f^2 \right)^2,$$

де  $W, H$  – довжина та ширина матричного фотоперетворювача відповідно;  $Q_{заг}$  – загальна кількість пікселів матричного фотоперетворювача;  $N, M$  – розміри зображення в пікселях;  $n, m$  – координата елемента зображення.

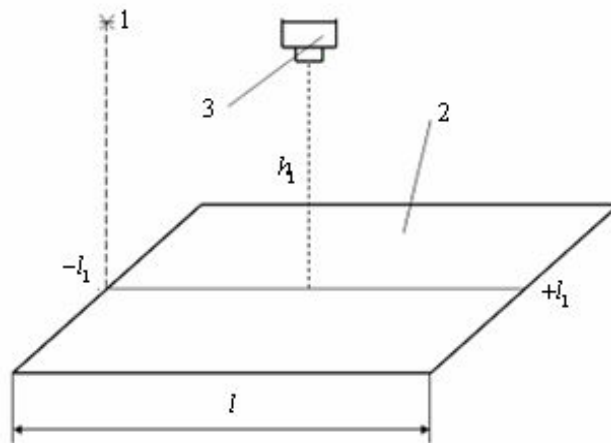


Рис. 7. Установка для вимірювання розподілу освітленості та яскравості

Зображення, отримані цифровою фотокамерою, були представлені у вигляді двомірних таблиць. Дане зображення завантажено в пакет MATLAB дійсними числами. За даними таблицями було розраховано яскравість зображення за формулами (1) та (2). Розрахунок яскравості зображення, а отже й освітленості поверхні світного об'єкта здійснено за допомогою розробленої програми, алгоритм якої полягає у наступному:

1. Задаємо умови вимірювань.
2. Вводимо зображення у вигляді RGB-матриці.
3. Обчислюємо  $Y$ - координату зображення.
4. Вводимо градуювальну криву.
5. За значеннями  $Y$ - координати, згідно з градуювальною кривою, визначаємо освітленість матричного фотоперетворювача в зоні зображення.
6. Вводимо модель світний об'єкт – фотокамера.
7. Згідно з освітленістю матричного фотоперетворювача та введеної моделі визначаємо параметри світлового поля об'єкта вимірювання.
8. Виводимо значення вимірювальних параметрів на екран.

У **четвертому розділі** проведено вимірювання розподілу освітленості світного об'єкта за вищенаведеною методикою. На рис. 8 наведено графік зміни освітленості, виміряної з допомогою фотокамери OLYMPUS E-420 (1) та люксметра Ю-116 (2).

На рис. 9 наведено результати вимірювань розподілу освітленості екрана, побудованого за зображенням, отриманим за допомогою цифрової фотокамери OLYMPUS E-420.

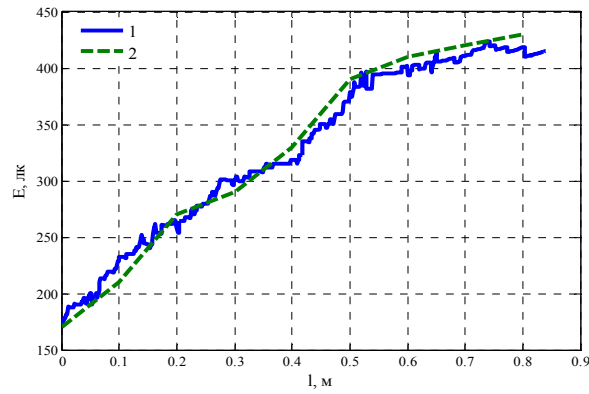


Рис. 8. Графіки зміни освітленості по поверхні світного об'єкта, отримані з допомогою: 1 –фотокамери OLYMPUS E-420; 2 –люксметра Ю-116

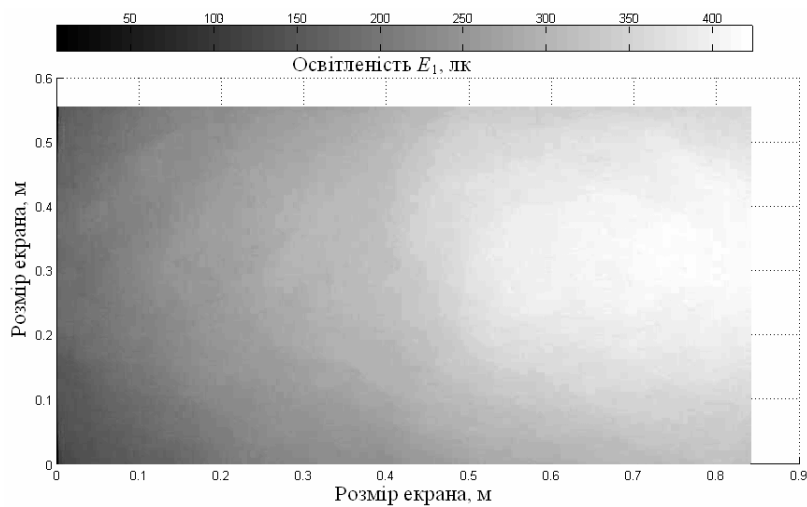


Рис. 9. Розподіл освітленості світної поверхні екрана, отриманий за допомогою фотокамери OLYMPUS E-420

Вимірювання світлового розподілу напівпровідникових джерел світла було проведено на експериментальній установці, представленій на рис. 10. На фотометричній лаві (1) встановлено світлодіод (2), розсіюючий екран (3) і фотокамеру (4). Оптична схема даної установки зображена на рис. 11.

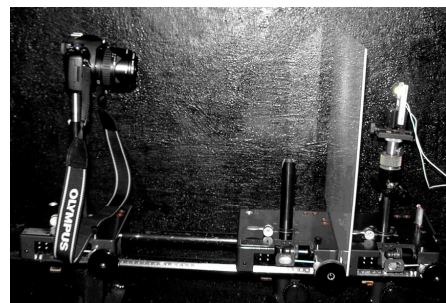
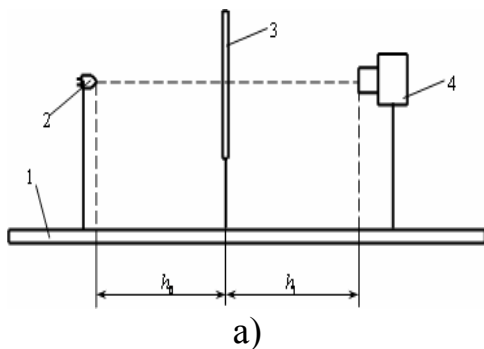


Рис. 10. Експериментальна установка для визначення світлорозподілу напівпровідникових джерел світла: а) оптична схема; б) фото

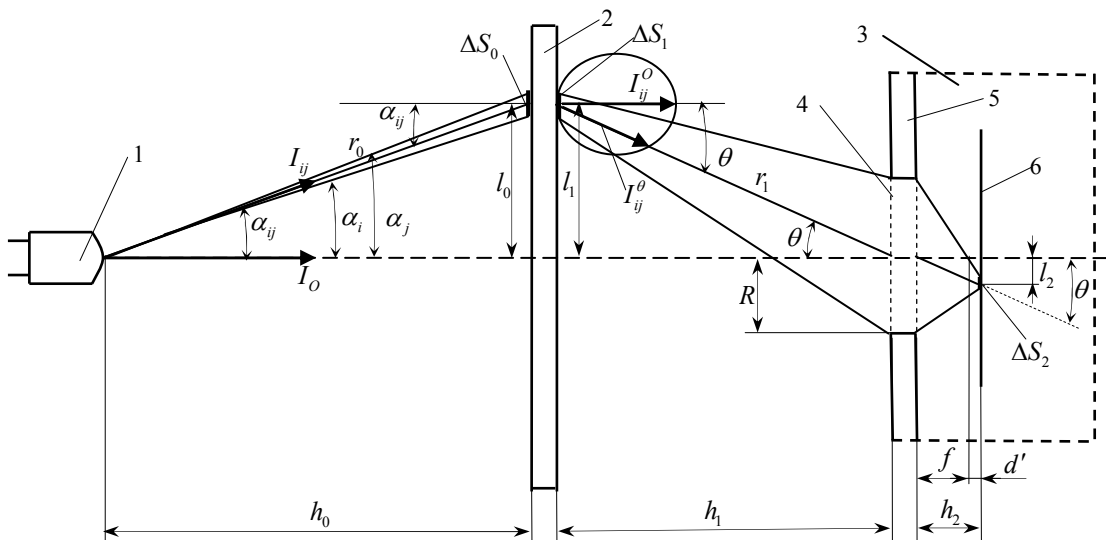


Рис. 11. Оптична схема системи: світлодіод – екран – фотокамера: 1 – світлодіод; 2 – екран; 3 – фотокамера; 4 – вхідний отвір об’єктива фотокамери; 5 – оптична система фотокамери; 6 – поверхня матричного оптичного перетворювача;

Як екран використовували пластину з матового скла з коефіцієнтом пропускання  $\tau_0 = 0,45$ . Відстань від світлодіода до екрана, виходячи зі стандартних відстаней для визначення усереднених значень сили світла світлодіода, була прийнятою  $h_0 = 0,1$  м або  $h_0 = 0,316$  м. В якості вимірювального пристрою використовували фотокамеру OLYMPUS E-420.

Для даної оптичної схеми отримано рівняння для визначення кривої світлорозподілу за цифровим зображенням екрана, освітленого досліджуваним світлодіодом:

$$\frac{I_{ij}}{I_0} = \left( \frac{Y_{ij}}{Y_0} \right)^{\frac{1}{b}} \cdot \frac{\cos \alpha_{ij}}{\cos^4 \theta},$$

де  $Y_{ij}$  – яскравість зображення елемента екрана, освітленого в межах дії  $I_{ij}$ ;  $Y_0$  – яскравість зображення елемента екрана, освітленого в межах дії  $I_0$ .

За заданою методикою проведено вимірювання світлорозподілу досліджуваного світлодіода. Криві світлорозподілу, отримані за допомогою фотокамери OLYMPUS E-420 та гоніофотометричної установки, приведені на рис. 12.

Двовимірні зображення можна також отримати за допомогою лінійного оптичного перетворювача. Для цього необхідно проводити сканування світлового поля об’єкта. Це відбувається шляхом механічного переміщення лінійного оптичного перетворювача відносно однієї з координат. На відміну від вимірювальних пристроїв з матричними

перетворювачами вимірювання пристроями з лінійними перетворювачами можна здійснювати лише з використанням світлопропускаючого екрана. Найдоцільнішим для світлотехнічних вимірювань є використання планшетних сканерів, у яких скануючий елемент переміщується відносно світлового поля з допомогою крокового двигуна.

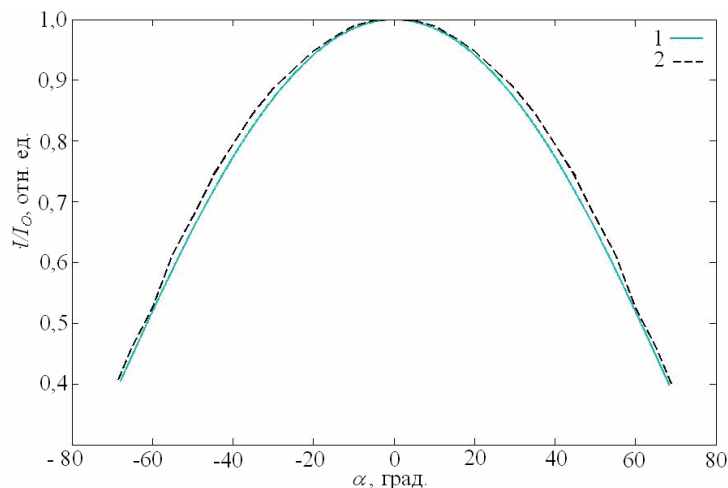


Рис. 12. Криві залежності сили світла від кута випромінювання, отримані за допомогою: 1 – OLYMPUS E-420; 2 – гоніофотометра

Для визначення світлового розподілу за допомогою пристроїв з лінійними фотоперетворювачами запропоновано установку, схема якої зображена на рис. 13, а її модель – на рис. 14. Дана установка складається із досліджуваного світлодіода (1), поміщеного в бокс (5) зі світлонепроникними стінками на відстані 100 мм над світлорозсіюючим екраном (2), розташованим на склі сканувального пристрою (3) зі скануючим елементом (4). Коефіцієнт відбивання стінок бокса був близький до нуля.

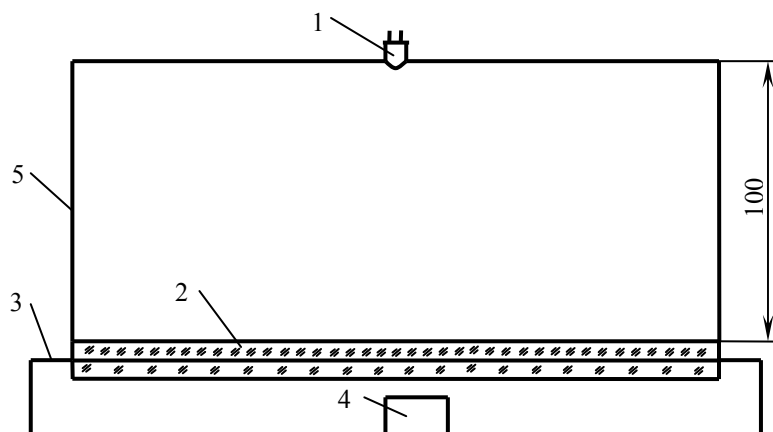


Рис. 13. Схема установки для визначення світлорозподілу напівпровідникових джерел світла

Як вимірювальні пристрої використано сканери Mustek BearPaw 2448TA Plus та EPSON PERFECTION V30.

Для даного типу пристроїв характерним є те, що освітленість фотоперетворювача формується світловим потоком, що пройшов крізь



екран від досліджуваного джерела світла, та світловим потоком, який випромінюється підсвіткою та відбивається від елемента поверхні екрана  $\Delta S_1$ . Тому рівняння для визначення світлорозподілу досліджуваного джерела світла має вигляд

$$\frac{I_{ij}}{I_0} = \frac{Y_{ij}^{\frac{1}{b}} - Y_a^{\frac{1}{b}}}{Y_0^{\frac{1}{b}} - Y_a^{\frac{1}{b}}} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_{ij}},$$

де  $Y_e$  – яскравість зображення елемента екрана при вимкненому досліджуваному джерелі світла.

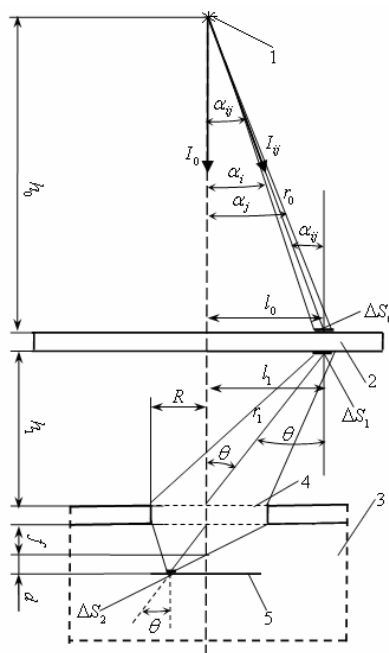
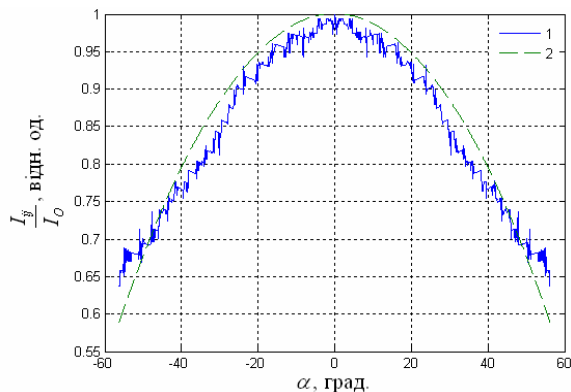


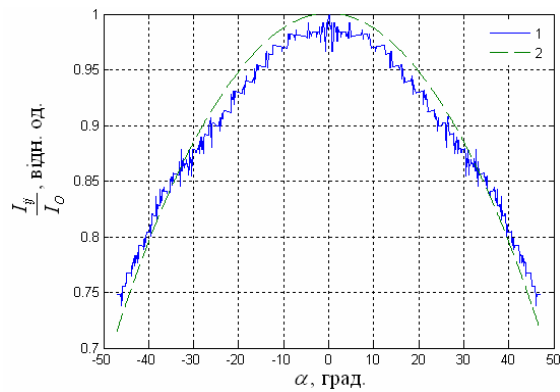
Рис 14. Модель системи: джерело світла – екран – скануючий пристрій:

- 1 – досліджуване джерело світла; 2 – екран; 3 – скануючий пристрій; 4 – вхідний отвір оптичної системи; 5 – оптичний перетворювач

За допомогою даної установки проведено вимірювання кривої світлорозподілу світлодіода EDEW-3LS6-B3. Криві світлорозподілу зображено на рис. 15.



а)



б)

Рис. 15. Криві світлорозподілу СД EDEW-3LS6-B3, отримані за допомогою Mustek BearPaw 2448TA Plus: а – поздовжня площина; б – поперечна площина

Для результатів вимірювання світлорозподілу, отриманих фотокамерою, гоніофотометром та сканувальним пристроєм, проведено розрахунок значень середніх ( $d_{сер}$ ) та середньоквадратичних відхилень ( $S_x$ ). Для даних пристроїв

$$d_{сер} = \frac{\sum_{j=1}^N \left| \sum_{i=0}^n p_i \cdot \cos^{n-i} \alpha_{ij} - \frac{I_{ij}}{I_o}(\alpha_{ij}) \right|}{N}, \quad S_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \left( \sum_{i=0}^n p_i \cdot \cos^{n-i} \alpha_{ij} - \frac{I_{ij}}{I_o}(\alpha_{ij}) \right)^2}{N-1}}$$

де  $N$  – кількість пікселів у рядку або стовпці зображення;  $p_i$  – коефіцієнти полінома кривої світлорозподілу, отриманої за допомогою гоніофотометра (коефіцієнти полінома кривої світлорозподілу, виміряної за допомогою гоніофотометра отримано за методом найменших квадратів, при цьому значення середньоквадратичної похибки становило  $\sigma = 1,37 \cdot 10^{-4}$  відн. од.).

За даними вимірювань обчислено абсолютну середньоквадратичну та максимальну відносну похибки, які наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

*Похибки вимірювань кривої світлорозподілу EDEW-3LS6-B3*

Прилад	Площина	Середньоквадратичне відхилення, відн. од.	Відносна похибка, %
OLYMPUS E-420		0,016	1,4
EPSON PERFECTION V30	Поздовжня	0,015	2,7
	Поперечна	0,012	1,8
Mustek BearPaw 2448TA Plus	Поздовжня	0,637	4,9
	Поперечна	0,016	2,3

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз структури та конструктивних особливостей матричних фотоперетворювачів. Відзначено основні недоліки та переваги матричних елементів у вимірювальній техніці. Визначено напрямки застосування матричних елементів у фотометрії.

2. Розроблено математичну модель вимірювального пристрою з матричним фотоперетворювачем, яка дозволяє розраховувати світлотехнічні параметри точкових джерел світла. Отримано вирази для роз-

рахунку яскравості цифрових зображень, які дозволяють розраховувати яскравості стиснених та нестиснених зображень.

3. Створено математичну модель системи світний об'єкт – фотокамера для світних об'єктів, поверхня яких розміщена перпендикулярно відносно оптичної осі фотокамери, що дає можливість проводити дистанційні вимірювання світлотехнічних параметрів світних об'єктів.

4. Розроблено методику градування матричних фотоперетворювачів та пристроїв на їх основі, що дозволяє визначити діапазон лінійності характеристичної кривої фотокамери, яка визначається залежністю логарифма яскравості зображення від логарифму експозиції. Для камери OLYMPUS E-420 цей діапазон знаходиться в межах від  $y = \lg Y = 1$  до  $y = \lg Y = 2,31$ . Встановлено, що вплив на яскравість зображення алгоритму стиснення даних у форматі JPEG є незначним, що дозволяє проводити світлотехнічні вимірювання з допомогою любительських фотокамер.

5. Розроблено алгоритм та програму розрахунку яскравості й освітленості поверхні досліджуваних об'єктів. Проведено вимірювання розподілу яскравості й освітленості по поверхні досліджуваного об'єкта за допомогою фотокамери OLYMPUS E-420. Запропоновано систему візуалізації на екрані комп'ютера розподілу освітленості по поверхні досліджуваного об'єкта.

6. Проведено оцінювання похибок вимірювання освітленості та світлового розподілу шляхом розрахунку середнього й середньоквадратичного відхилення. Встановлено, що відносна похибка при вимірюваннях фотокамерою не перевищує 3 %. Середньоквадратичне відхилення між яскравостями нестиснених та стиснених зображень для всього діапазону вимірювання не перевищує 2 %.

7. Створено математичні моделі пристроїв з лінійними та матричними фотоперетворювачами та запропоновано методики для вимірювання світлотехнічних параметрів напівпровідникових джерел світла.

8. На основі запропонованих моделей та методик проведено вимірювання кривої світлорозподілу світлодіода марки EDEW-3LS6-B3 за допомогою фотокамери OLYMPUS E-420, сканерів EPSON PERFECTION V30 та Mustek BearPaw 2448TA Plus. При цьому відносна похибка результатів вимірювань, отриманими за допомогою пристроїв з матричними й лінійними перетворювачами не перевищує 5 %.

## **ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Я. Осадца. Матричні перетворювачі світла з цифровим представленням сигналу /Я. Осадца, Р. Ріпецький // Світлотехніка та електроенергетика – 2009. – №4(20). – С. 4-8.

2. В. Андрійчук. Автоматизована інформаційно-вимірювальна система на базі спектрофотометра СФ-46 для контролю світлотехнічних характеристик джерел світла та світлотехнічних матеріалів / В. Андрійчук, Ю. Підгайний, Я. Осадца // Світлотехніка та електроенергетика – 2010. – №1. – С. 31-36.

3. Андрійчук В. Вимірювання світлотехнічних характеристик світних об'єктів за допомогою фотокамер з матричними оптичними перетворювачами / Андрійчук В., Осадца Я. // Вісник ТНТУ. – 2011. – Том 16. – № 1. – С.126-132. – (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).

4. Андрійчук В. Применение фотокамер с матричными оптическими преобразователями в фотометрии. / Андрійчук В., Осадца Я. // Оптический журнал. – 2012. – Том 79. – № 2. – С. 40-44. – (оптическое приборостроение и технология).

5. Андрійчук В. Визначення світлорозподілу напівпровідникових джерел світла з допомогою пристроїв з лінійними фотоперетворювачами / Андрійчук В., Осадца Я. // Вісник ТНТУ. – 2011. – Том 16. – № 3. – С. 196-202. – (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).

6. В. Андрійчук. Використання матричних оптичних перетворювачів у фотометрії світлодіодів / В. Андрійчук, О. Кошик, Я. Осадца // Світлолюкс – 2010, № 3. – С. 57 – 60.

7. В. Андрійчук. Фотометрія зовнішнього освітлення / В. Андрійчук, Я. Осадца, С. Поталіцин // Світлолюкс, 2011. – № 5. – С. 58-62.

8. Матричні перетворювачі світла з цифровим представленням сигналу: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції [«Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики»], (Харків, 2009 р.). – Х.: ХНАМГ, 2009 – 134 с.

9. Використання цифрових матричних елементів у фотометрії: матеріали Всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 13 – 14 травня 2009 р.). – Т.: ТДТУ, 2009 – 468 с.

10. Модель пристрою для вимірювання параметрів світлового поля з використанням матричних оптичних перетворювачів: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції [«Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» ], (Тернопіль, 20 – 21 травня 2010 р.). – Т.: ТНТУ, 2010. – 614 с.

11. Photometry of light-emitting diodes and light devices that are based on these diodes: 15<sup>th</sup> INTERNATIONAL WORKSHOP ON INORGANIC AND ORGANIC ELECTROLUMINESCENCE & 2010 INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SCIENCES AND TECHNOLOGY OF EMISSIVE DISPLAYS AND LIGHTING & XVIII ADVANCED DISPLAYS TECHNOLOGIES INTERNATIONAL SYMPOSIUM. (St-Peterburg, Russia. September 27 – October 1, 2010). – St-Peterburg: St-

Peterburg State Institute of Technology (Technical University), 2010. – 302 р.

12. Градування матричних оптичних перетворювачів та фотокамер на їх основі: збірник тез доповідей XIV Наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 27 – 28 жовтня 2010 р.). – Т.: ТНТУ, 2010. – 82 с.

13. Вимірювання світлотехнічних характеристик об'єктів за допомогою фотокамер з матричними оптичними перетворювачами: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів [«Актуальні задачі сучасних технологій»], (Тернопіль, 21 – 22 грудня 2010 р.). – Т.: ТНТУ, 2010. – 181 с.

14. Дистанционное измерение светотехнических параметров светящихся объектов: сборник научных трудов VIII Международной научно-технической конференции [«Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики»], (Россия, Саранск, 25 – 26 ноября 2010); редкол.: Л.В. Абрамова (отв. ред.) [и др.]. – Саранск: СВМО, 2010. – 320 с.

15. Дистанційна фотометрія зовнішнього освітлення: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції [«Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики»], (Харків, 13 – 14 квітня, 2011 р.). – Х.: ХНАМГ, 2009 – 179 с.

16. Фотометрія напівпровідникових джерел світла з допомогою пристроїв з лінійними фотоперетворювачами: матеріали науково-технічної конференції [«Сучасний стан і перспективи розвитку світлотехніки та електроенергетики»], (Тернопіль, 19 травня 2011 р.). – Т.: ТНТУ, 2011. – 60 с.

17. Вимірювання світлорозподілу напівпровідникових джерел світла з допомогою фотокамер з матричними фотоперетворювачами: збірник тез доповідей XV Наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 14 – 15 грудня 2011 р.). – Т.: ТНТУ, 2011. – 340 с.

18. Використання цифрових фотокамер у світлотехнічних вимірюваннях зовнішнього освітлення: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції [«Світлотехніка та електроенергетика: історія, проблеми, перспективи»], (Тернопіль, 24 – 26 квітня 2012 р.). – Тернопіль: ТНТУ, 2010. – 130 с.

### **Анотація**

**Осадца Я.М.** Вимірювання параметрів світлового поля за допомогою матричних фотоперетворювачів з цифровим представленням сигналу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.07 – світлотехніка та джерела світла. –

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, м. Тернопіль, 2012.

У дисертації проведено дослідження матричних фотоперетворювачів з цифровим представленням сигналу та пристроїв на їх основі. Визначено основні шляхи їх використання для світлотехнічних вимірювань.

Побудовано математичні моделі вимірювальних пристроїв з матричними та лінійними оптичними перетворювачами, які дають можливість розраховувати світлотехнічні параметри світних об'єктів.

Запропоновано методику градування матричних оптичних перетворювачів та пристроїв на їх основі, що дозволило визначати діапазон лінійності характеристичної кривої фотокамери. Проведено експериментальні дослідження впливу алгоритму стиснення на величину яскравості цифрового зображення.

Розроблено алгоритм та програму для розрахунку яскравості та освітленості поверхні досліджуваних об'єктів.

Проведено вимірювання розподілу освітленості по поверхні світлого об'єкта з допомогою фотокамери, а також кривої світлорозподілу напівпровідникових джерел світла за допомогою пристроїв з лінійними та матричними оптичними перетворювачами.

**Ключові слова:** матричний фотоперетворювач, яскравість цифрового зображення, освітленість, цифрова фотокамера, лінійний оптичний перетворювач, світний об'єкт, сканувальний пристрій, дифузнопропускаючий екран, коефіцієнт яскравості, оптична система.

### **Аннотація**

**Осадца Я.М.** Измерение параметров светового поля с помощью матричных фотопреобразователей с цифровым представлением сигнала. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.07 – светотехника и источники света. – Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя, г. Тернополь, 2012.

В диссертации определены основные пути использования матричных фотопреобразователей с цифровым представлением сигнала и устройств на их основе в измерениях светотехнических параметров светящихся объектов.

Создано математические модели измерительных приборов с матричными и линейными оптическими преобразователями, которые дают возможность проводить расчеты светотехнических параметров по полученным изображениям объектов.

Предложено методику градуирования матричных оптических преобразователей и устройств на их основании. Даная методика позволяет

определять диапазон линейности характеристической кривой фотокамеры.

Проведены экспериментальные исследования влияния алгоритма сжатия на величину яркости цифрового изображения. Установлено, что влияние алгоритма сжатия в формате JPEG на яркость изображения есть незначительным, что расширяет круг фотокамер, с помощью которых можно проводить светотехнические измерения.

Для проведения расчетов яркости и освещенности поверхности исследуемых объектов разработано алгоритм и программу расчета светотехнических параметров на ЕОМ. Предложена система визуализации на экране компьютера распределения освещенности по поверхности исследуемого объекта.

С помощью фотокамеры OLYMPUS E 420 проведены измерения распределения освещенности по поверхности светящего объекта, а также кривой светового распределения полупроводниковых источников света с помощью фотокамеры OLYMPUS E 420 и сканирующих устройств Mustek BearPaw 2448TA Plus и EPSON PERFECTION V30. При этом относительная погрешность результатов измерений не превышает 5 %.

**Ключевые слова:** матричный фотопреобразователь, яркость цифрового изображения, освещенность, цифровая фотокамера, линейный оптический преобразователь, светящийся объект, устройство для сканирования, диффузно пропускающий экран, коэффициент яркости, оптическая система.

## Summary

**Osadtsa Y.** Measuring parameters of the light field with the help of matrix light transformers with digital presentation of signal. – Manuscript.

Thesis to attain a Doctor of Philosophy (science) degree, specialty code 05.09.07 – Lighting and Light Sources. Ternopil State Techcal University named after Ivan Pul'uj, Ternopil, 2012.

In this thesis was conducted researches of matrix light transformers with digital presentation of signal and devises on theirs basis. The basic ways of theirs using for the light engineering measuring was determined.

The method calibration of matrix optical transformers and devices on theirs basis was offered. It allows to determine the range of linearity characteristic curve of the photcamera. The experimental researches impact compressional algorithm to amount brightness of digital image was conducted. It is set that impact algorithm compression in JPEG format to the image brightness is insignificant, it extends circle photcamers which helps can conduct light engineering measurings .

The algorithm and program for the calculation brightness and illuminance surface of probed object was developed. The system of visualization was offered on the computer screen on the surface of the probed object.

The measurements distributing of luminosity on the surface lighting object with help of photcamera OLYMPYS E 420, and also with curve of light distribution semi-conducting light sources with help photcamera OLYMPYS E 420 and scanning devices Mustek BearPaw 2448TA Plus and EPSON PERFECTION V 30 was conducted. The relative error of measuring results does not exceed 5 %.

**Keywords:** matrix light transformer, brightness of digital image, illuminance, digital photcamera, linear optical transformer, luminous object, scanning device, diffusely dispersive screen, brightness coefficient, optical system.